

氏 名	増 田 俊 平
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	第 5152 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項
学 位 論 文 名	Fast-Forward Problem : Theory and Application 早送り問題：理論とその応用
論文審査委員	主 査 教 授 中 村 勝 弘 副 査 教 授 細 田 誠 副 査 教 授 中 山 正 昭

論 文 内 容 の 要 旨

近年、微細加工の技術の進歩に伴い、量子効果を利用したナノデバイスの研究が盛んに行われている。この論文では交流電圧を整流する効果をもつ二次元量子ドットを提案した。とくにスピン軌道相互作用やアハロノフ・ボーム (AB) フラックスを利用した整流効果を考察した。さらに電子が早送りされた運動を行うための条件を考え、経路積分を用いて量子整流との関係を明らかにした。

第一章では研究の背景と概要を述べた。

第二章では二次元量子ドットにスピン軌道相互作用を作用することにより、スピン偏極入力に対する整流効果をもつ量子デバイスを提案した。この量子整流の機構にはドットの対称性が非常に大きな役割を果たす。ここでは整流効果とドットの幾何学的な対称性の関係を明らかにした。また古典力学と量子力学での粒子の早送り条件を考え、両者の間には違いがある事を明らかにした。さらにその中間のパラメータ領域を準早送り領域と名づけ、その性質を解析した。この領域の性質は上で述べた量子ドット内の電気伝導に現れ、準早送り領域の解析により整流効果のFermi波数—スピン軌道相互作用依存性に関する振動構造の規則性の起源を明らかにした。

第三章では量子整流のもう一つのメカニズムとしてABフラックスを用いる事を提案した。このモデルでは量子ドットの中央に三角形の剛体壁ポテンシャルがあり、その中心にABフラックスがある。ドットに印加されている交流電圧にシンクロナイズしてこのABフラックスを切り替えてやることで整流効果が得られる。ドットの幾何学的構造と整流効果の関係を調べた。さらに磁場がある場合の準早送り領域の性質を一般的に議論することで整流効果のFermi波数—ABフラックス依存性を説明した。

第四章では二、三章の早送り領域の議論を一般論へと拡張し量子ドット内の波動関数の時間発展を電子の質量を変えることなく早送りする方法について述べた。この早送りの過程では波動関数の付加的な位相が重要な働きをする。この理論はさまざまな系に適用可能であり、二次元空間の波束の運動、ソリトンさらに二準位系のダイナミクスの早送りを具体例として取り上げた。さらに状態空間内のショートカットという概念を導入することで、より一般的な早送りについて述べた。

第五章はまとめとこれからの問題点について述べた。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

ナノスケールの世界を記述する量子力学の法則によると、電子は波であるだけでなく、粒子としても振る舞う。この法則はニュートン力学とは異質なものである。本論文では、量子系における早送り問題の物理を提案し、具体的に、量子ビリヤード (量子ドットともいう) における電子波の早送りを、電子に作用するポテンシ

ヤルを時間的に制御することで実現しようとしている。

本論文は5つの章からなり、最初と最後の章はそれぞれ序論と結論にあてられている。

第二章では二次元量子ドットにスピン軌道相互作用を導入することにより、スピン偏極入力に対する整流効果をもつ量子デバイスを提案している。この量子整流の機構にはドットの幾何学的な対称性が関与することを明らかにしている。また古典力学と量子力学での粒子の早送り条件を考え、両者の違いに注目し、その中間のパラメータ領域（準早送り領域）の性質を経路積分を用いて解析している。その解析により整流効果のFermi波数やスピン軌道相互作用依存性にあらわれる振動構造の規則性の起源を明らかにしている。

第三章では量子整流のもう一つのメカニズムとして、アハロノフ＝ボーム（AB）磁気フラックスを用いる事を提案している。このモデルでは量子ドットの中央に三角形の剛体壁ポテンシャルがあり、その中心にABフラックスがある。ドットに印加されている交流電圧にシンクロナイズしてこのABフラックスを切り替えてやることで整流効果が得られる。ABフラックスがある場合の準早送り領域の性質を経路積分を用いて解析することで整流効果の振動構造の起源を説明している。

第四章では二、三章の準早送り領域の議論を一般論へと拡張し量子ドット内の波動関数の時間発展を電子の質量を変えることなく完全に早送りする方法について述べている。この早送りの過程では波動関数の付加的な位相が重要な働きをする。著者は、この早送りの理論を、ソリトンの運動や二準位系のダイナミクスなどさまざまな具体的な系に適用している。さらに状態空間内のショートカットという概念を導入し、より一般的な早送りとその意義についても述べている。

以上のように、本論文は、ナノテクノロジーから生まれた量子ドットの非平衡量子輸送の性質を早送り問題の立場から理論的に解析し、工学的に重要な予測をおこなっている。これらの研究成果は、ナノサイエンス、数理工学の発展に寄与するところが大きい。したがって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格を有するものと認める。